

# 各種断面形状の単柱橋脚の弾塑性地震応答解析

## Analysis of Elasto-Plastic Earthquake Response of Single-Column Piers of Various Sectional Forms

能登 宥 愿\* 林 暢 彦\*\*  
Hiroyoshi NOTO Nobuhiko HAYASHI

### Summary

It seems impossible, in terms of time and expense, to determine empirically the earthquake responses of steel bridge piers of various sectional forms. These earthquake responses are therefore estimated through the reasonably proportioned use of experiments and analyses.

First, hysteresis characteristics of a steel bridge pier are obtained experimentally and by elasto-plastic FEM analysis. The analytical results were compared with the experimental results and good agreement is recognized. Secondary, earthquake response values are analyzed using analytical hysteresis characteristics by elasto-plastic earthquake response analysis. The results concur very well with response values determined from a hybrid experiment.

キーワード：復元力特性，弾塑性地震応答，保有水平耐力

### 1. まえがき

各種断面形状<sup>1) 2)</sup>の鋼製橋脚の地震応答を実験から求めることは、実験に要する日時、費用の面から不可能であると考えられる。そこで実験と解析をバランス良く用いることにより地震による応答値を求めることを考える。

最初に鋼製橋脚の弾塑性地震応答解析に用いる復元力特性を求める。これは相似形の代表的な断面形状の供試体の繰り返しの影響を考慮した載荷実験データに基づいて求める。この実験を解析的にシミュレーションすることができれば各種断面形状の単柱橋脚の復元力特性が既知となり、それを用いて簡単な構造系で地震時応答特性を解析的に求めることができる。ここで扱う断面形状は矩形、四隅円弧付き矩形、八角形、円形とする。

### 2. 準静的弾塑性有限変位解析

#### (1) 解析方針

保有水平耐力の算定、非線形動的解析には、準静的解析による橋脚断面等の形状・形式別の水平荷重—水平変位のヒステリシスループを求め、それを基に骨格曲線を作成する。著者等が解析した結果<sup>3)</sup>によると矩形断面、円

形断面で5～6 $\delta_y$ まで実験値と解析値がほぼ一致している。

本論文で扱う4つの断面形状は、特性値がそれ自身を含めて矩形断面と円形断面の間にあると考えられ、解析値は実験値を反映すると思われる。そこで四隅円弧付き矩形、八角形断面も解析値が良い精度を示すと考えられる。

#### (2) 解析モデル

柱の断面形状は次の4タイプとする。

- ①矩形断面
- ②四隅円弧付き矩形断面
- ③八角形断面
- ④円形断面

解析モデルは単柱で、荷重は鉛直定荷重 $P=0.15P_y$ 、水平荷重 $H$  ( $n\delta_y$ の変位を与える荷重)である(図-1参照)。

#### (3) 設計条件

- ①断面積一定(縦補剛材算入しない)  $A=53.19\text{cm}^2$
- ②フランジ、ウェブ厚  $t=4.5\text{mm}$
- ③補剛材の有無と剛度  
標準補剛材 $p135\times 4.5$   $I=6.43>I_{re}=5.03\text{cm}^4$   
補強補剛材 $p155\times 6$   $I=33.27>I_{re}=6.26\text{cm}^4$

\* 技術本部先行技術研究室長

\*\* 技術本部設計部設計第一課

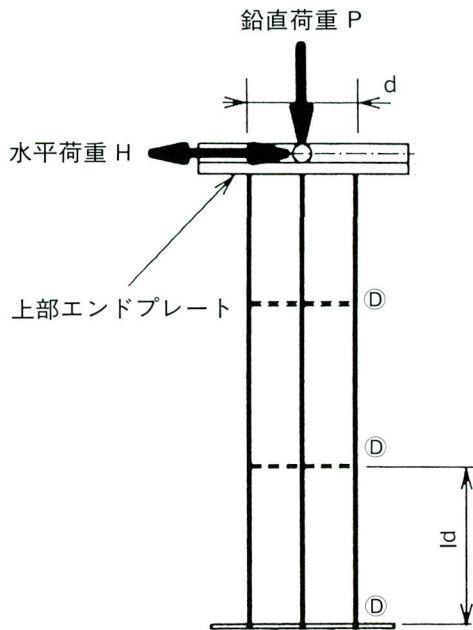


図-1 解析モデル

④幅厚比パラメータ：Rf

$$Rf = b/t \{ (\sigma_y/E) (12 (1-\mu^2)/\pi^2 k) \}$$

b：板幅，t：板厚， $\sigma_y$ ：鋼材の降伏点

E：ヤング係数， $\mu$ ：ポアソン比

k：座屈係数（両端支持=4.0，補剛板=4n<sup>2</sup>）

細長比パラメータ： $\lambda$

$$\lambda = Kh/r \{ 1/\pi \cdot \sqrt{(\sigma_y/E)} \}$$

K：有効座屈長係数（=2.0）

h：柱高，r：断面2次半径

表-1 幅厚比パラメータ

	補剛材	b	t	k	Rf
矩 形	無し	29.55	0.45	4	1.168
	有り	29.55	0.45	16	0.584
四隅円弧 付き矩形	無し	29.55	0.45	4	1.168
	有り	29.55	0.45	16	0.584
八 角 形	無し	14.78	0.45	4	0.584
円 形	無し	-	0.45	-	-

表-2 細長比パラメータ

	r	K	h	$\lambda$
矩 形	12.065	2.0	130.0	0.232
四隅円弧	12.065	2.0	130.0	0.232
八 角 形	12.953	2.0	130.0	0.216
円 形	13.301	2.0	130.0	0.210

⑤降伏時の荷重とそのときの変位 $H_y$ ， $\delta_y$ の定義

$$\delta_y = H_y \cdot h^3 / 3EI$$

$$H_y = (\sigma_y - P/A) \cdot Z/h$$

$$P = 0.15P_y, \quad P_y = A \cdot \sigma_y$$

(4) 解析条件

解析は4節点シェル要素を使用した有限要素法解析とする。その条件は次の通りである。

- ①弾塑性、大変形解析
- ②フォン・ミーゼスの降伏条件
- ③降伏応力はひずみ速度依存性を考慮しない
- ④加工硬化係数=0, 0, 0.01
- ⑤等方硬化則：単調増加荷重載荷  
移動硬化則：繰り返し荷重載荷

(5) 解析結果

弾塑性解析と正負交番繰り返し載荷実験の対比は、6社共同研究の報告書<sup>3)</sup>で示した著者等の解析結果と実験結果で行う。

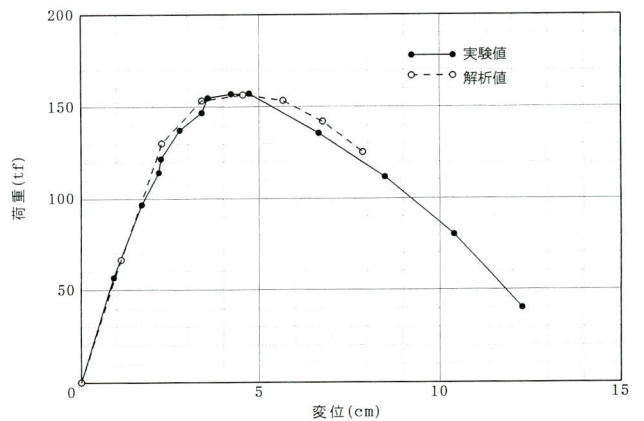


図-2 a 矩形断面橋脚の骨格曲線

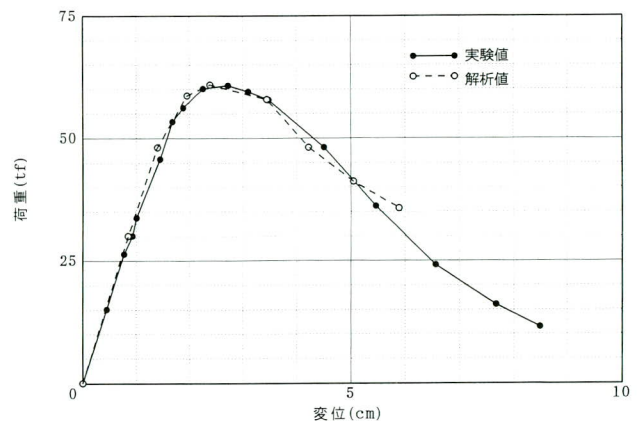


図-2 b 円形断面橋脚の骨格曲線

①矩形断面供試体、円形断面供試体の最大荷重到達後  $5\delta_y \sim 6\delta_y$  位まで実験、解析値(MARC)は比較的良く一致したヒステリシスループを示す(図-2参照)。

②さらに変位が増して  $7\delta_y$  を過ぎると、低下率が実験結果に比べて小さい。これは劣化時の解析の構成則が現実を反映していないためであるが、実用面からは何等問題がない。

本研究での解析の両振り載荷のヒステリシスループの結果を図-3に示す。

- a) 矩形断面(縦リブ剛度  $\gamma/\gamma_{re}=1.0$ ): C4-T
- b) 矩形断面(縦リブ剛度  $\gamma/\gamma_{re}=5.0$ ): C4R5-T
- c) 四隅円弧(縦リブ剛度  $\gamma/\gamma_{re}=1.0$ ): CR-R-T
- d) 四隅円弧(縦リブ剛度  $\gamma/\gamma_{re}=5.0$ ): CR-5R-T
- e) 八角形断面(縦リブ無し): OCT-T
- f) 円形断面(縦リブ無し): COL-T

エネルギー吸収能(水平力と変位で囲まれた面積)は縦リブの剛度によっても差は生じるが、矩形が円形に近づくに従って大きくなる事が分かる。

本研究での解析の両振り載荷の  $8\delta_y$  の座屈の状況を図-4に示す。

柱基部の座屈の状況が縦リブの剛度の大きさによって凹部がより明確に二つの谷に分かれたり、また断面形状が円形に近づくに従って全体が外面に膨れる(象の脚座屈)傾向にある事が分かる。

### 3. ハイブリッド地震応答実験と弾塑性地震応答解析の対比

ハイブリッド地震応答実験と弾塑性地震応答解析との対比は、6社共同研究の報告書<sup>3)</sup>で示した著者等の解析結果と実験結果で行う。

矩形断面は復元力特性を完全弾塑性、地震波は兵庫県南部地震波(I種地盤,  $\alpha_{max}=818gal$ )、円形断面は復元力特性を硬化型バイリニア、地震波は兵庫県南部地震波(I種地盤,  $\alpha_{max}=818gal$ )での応答値について述べる。上記の条件での実験と解析の比較値は、両断面共反力、変位は良く合っているが、残留変位に誤差が見られる。矩形、円形断面についてその結果を図-5に示す。

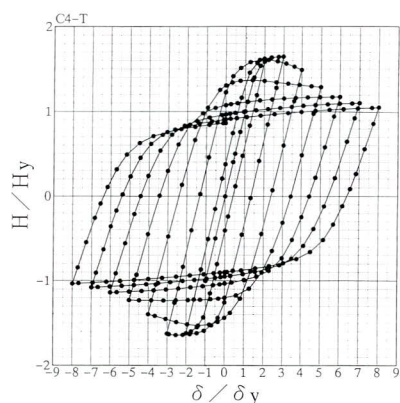


図-3 a C4-Tの復元力特性

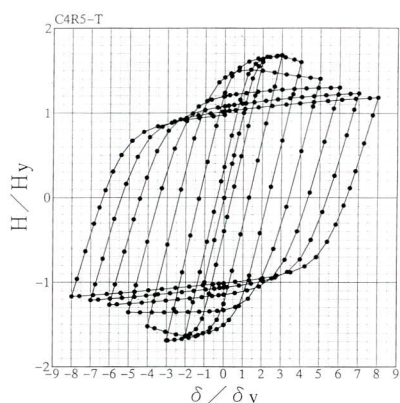


図-3 b C4R5-Tの復元力特性

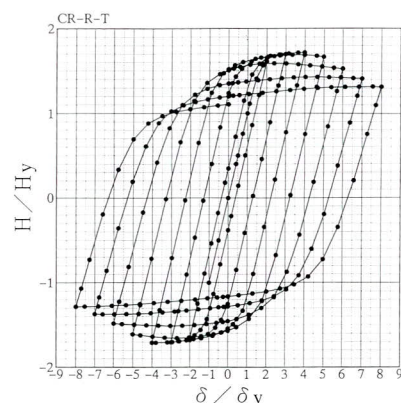


図-3 c CR-R-Tの復元力特性

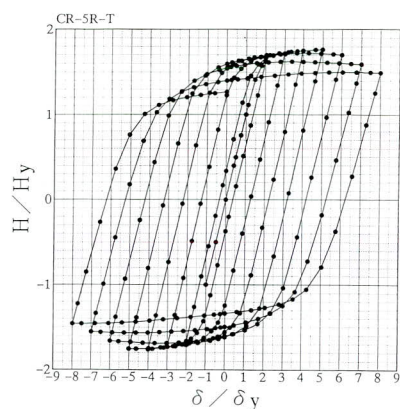


図-3 d CR-5R-Tの復元力特性

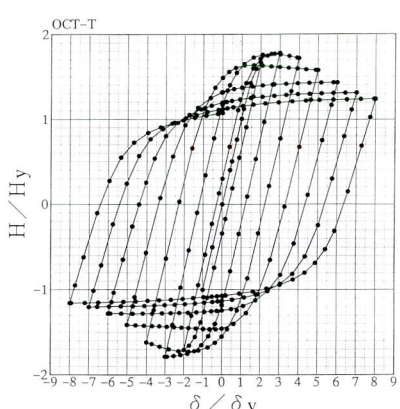


図-3 e OCT-Tの復元力特性

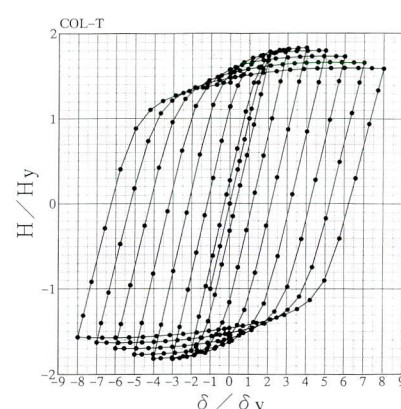


図-3 f COL-Tの復元力特性

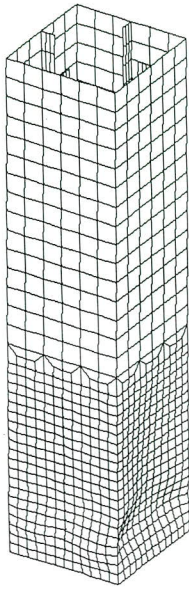


図-4 a C4-T

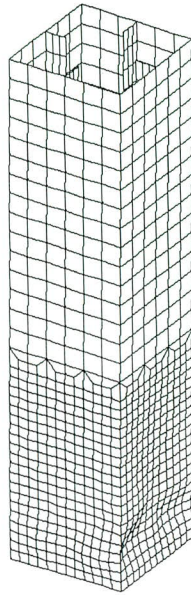


図-4 b C4R5-T

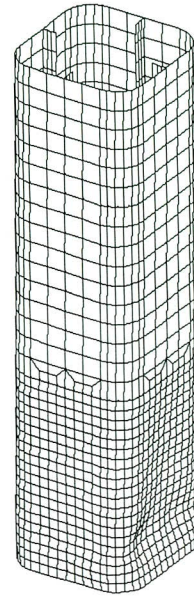


図-4 c CR-R-T

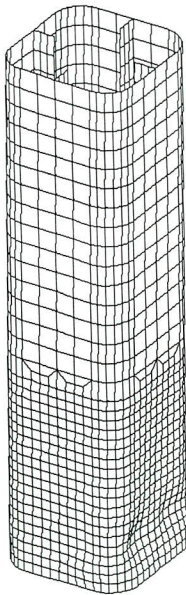


図-4 d CR-5R-T

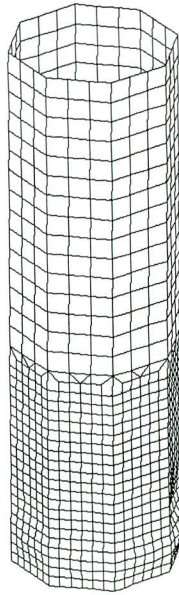


図-4 e OCT-T

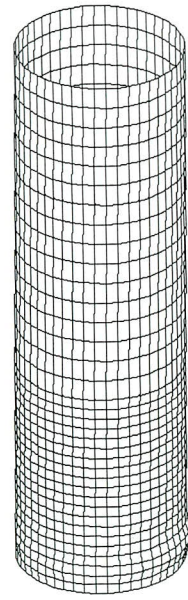


図-4 f COL-T

本論文で解析した各種断面形状の復元力特性は完全弾塑性型バイリニア、入力地震波形は兵庫県南部地震波(神戸海洋気象台のI種地盤,  $\alpha_{\max}=818\text{gal}$ と $\alpha_{\max}=1227\text{gal}$ )である。ここでの完全弾塑性バイリニアとは、第一勾配が零と( $H_y, \delta_y$ )を通る直線で第二勾配が最大水平力を通る水平線である。弾塑性地震応答解析結果を表-3, 表-4に示す。また反力, 水平変位の時刻歴応答結果を図-6に示す。

#### 4. まとめ

各種断面形状の水平荷重-水平変位のヒステリシスループがデータベースとして確保されれば、鋼製橋脚の弾塑性地震応答解析が設計として行えるようになる。ここでは、最大加速度は大きいとその継続時間の短い神戸海洋気象台での地震波を使用した。最大加速度はこれより小さいが継続時間の長い東神戸等での地震波は応答

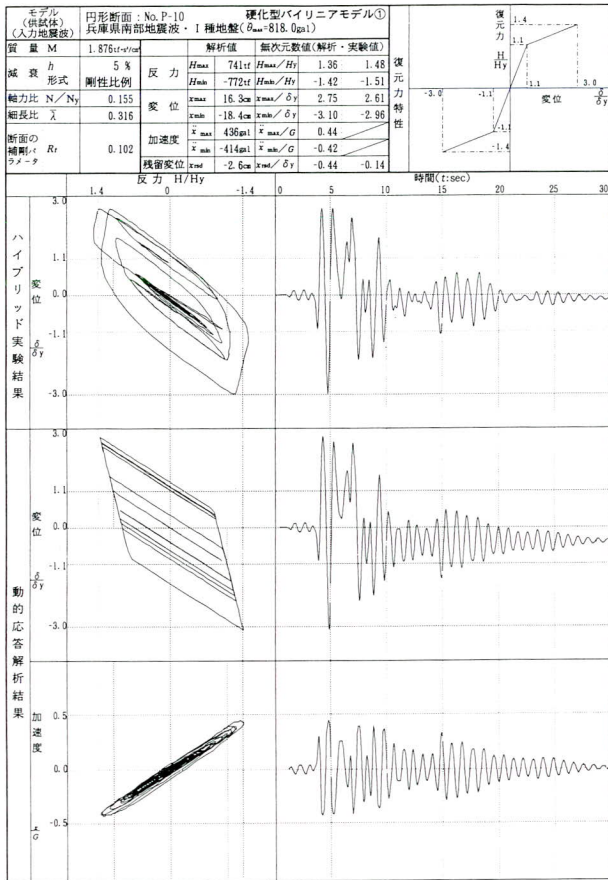


図-5 a 矩形断面の応答値

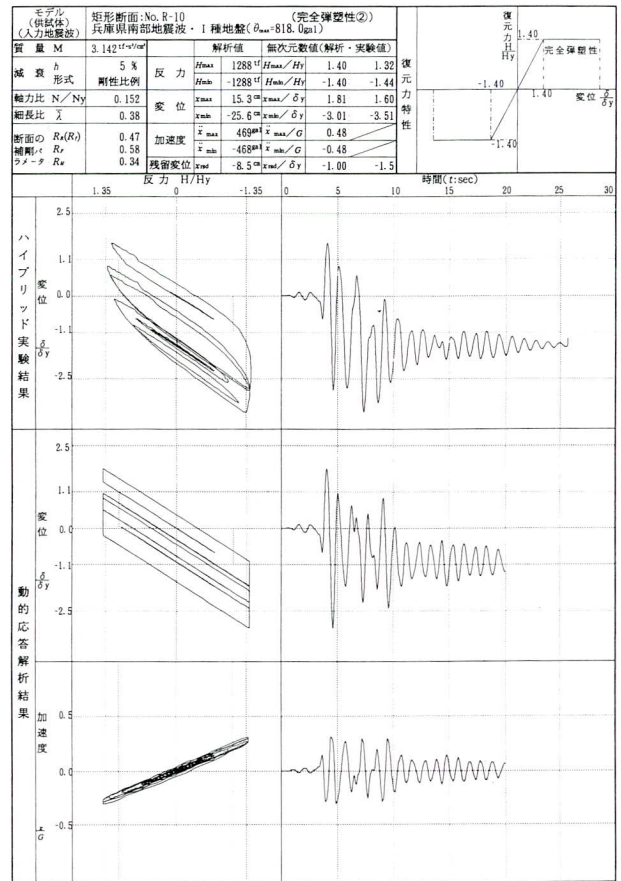


図-5 b 円形断面の応答値

表-3 各種橋脚断面形状の弾塑性地震応答解析【1】(完全弾塑性型バイリニア)

入力地震波形状: 神戸海洋気象台 I種地盤  $\alpha_{max}=818 gal$  実断面比=8

断面	補剛材 $\gamma/\gamma*$	Rf	$\lambda$	Hy tonf	Hmax	Hmin	$\delta y$	$\delta_{max}$	$\delta_{min}$	h	$\delta r$	$\delta r$	$\delta r$
					Hy	Hy	cm	$\delta y$	$\delta y$				
矩形	1	0.584	0.232	7.239	1.736	-1.736	0.3648	3.404	-9.590	130	0.318	0.871	1/409
矩形	5	0.584	0.232	7.257	1.685	-1.685	0.3648	3.409	-9.377	130	0.227	0.621	1/574
四隅円弧矩形	1	0.584	0.232	7.438	1.720	-1.720	0.3317	3.425	-10.22	130	0.185	0.559	1/700
四隅円弧矩形	5	0.584	0.232	7.451	1.757	-1.757	0.3317	3.412	-10.28	130	0.211	0.637	1/615
八角形	0	0.584	0.216	6.698	1.776	-1.776	0.3030	3.815	-11.05	130	0.065	0.216	1/2000
円形	0	0.210	0.653	1.834	-1.834	0.2875	3.936	-11.58	130	0.259	0.900	1/502	

表-4 各種橋脚断面形状の弾塑性地震応答解析【2】(完全弾塑性型バイリニア)

入力地震波形状: 神戸海洋気象台 I種地盤  $\alpha_{max}=1227gal$  実断面比=8

断面	補剛材 $\gamma/\gamma*$	Rf	$\lambda$	Hy tonf	Hmax	Hmin	$\delta y$	$\delta_{max}$	$\delta_{min}$	h	$\delta r$	$\delta r$	$\delta r$
					Hy	Hy	cm	$\delta y$	$\delta y$				
矩形	1	0.584	0.232	7.239	1.736	-1.736	0.3648	5.624	-12.00	130	0.638	1.750	1/204
矩形	5	0.584	0.232	7.257	1.685	-1.685	0.3648	5.674	-11.70	130	0.630	1.726	1/206
四隅円弧矩形	1	0.584	0.232	7.438	1.720	-1.720	0.3317	5.674	-13.24	130	0.342	1.030	1/381
四隅円弧矩形	5	0.584	0.232	7.451	1.757	-1.757	0.3317	5.631	-13.39	130	0.311	0.939	1/417
八角形	0	0.584	0.216	6.698	1.776	-1.776	0.3030	6.371	-14.06	130	0.543	1.791	1/240
円形	0	0.210	0.653	1.837	-1.837	0.2875	6.542	-14.94	130	0.442	1.539	1/294	

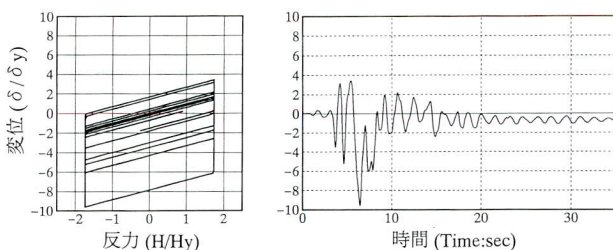


図-6 a C4-Tの応答値

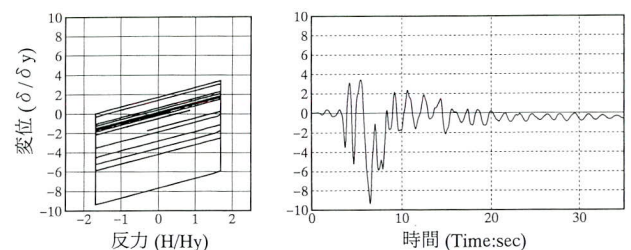


図-6 b C4-R5-Tの応答値

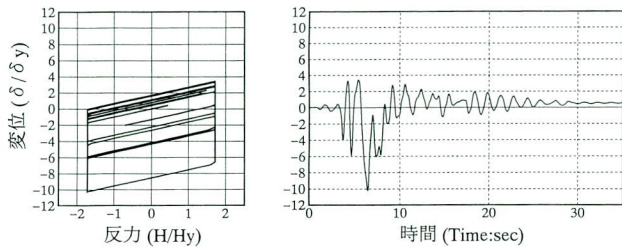


図-6c CR-R-Tの応答値

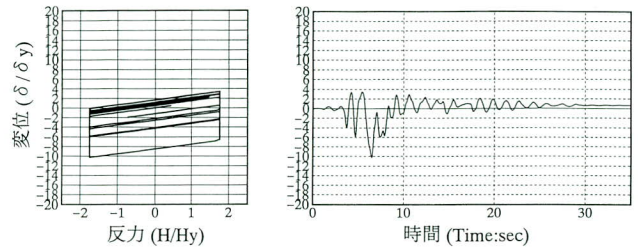


図-6d CR-5R-Tの応答値

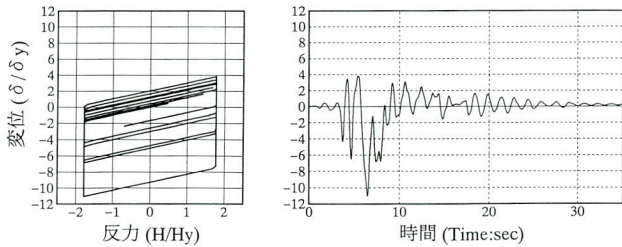


図-6e OCT-Tの応答値

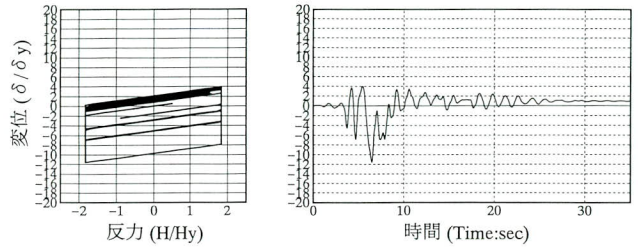


図-6f COL-Tの応答値

変位、残留変位が大きくなることが予想される。

## 5. あとがき

ここでは復元力特性および地震波形を特定して検討したが、今後適用範囲を広げて検討していきたいと考えている。またラーメン橋脚についても同様に検討を続けていく予定である。

## ＜参考文献＞

- 1) 能登ら：各種橋脚断面形状の耐荷力の検討（その1），宮地技報No.11, 1995
- 2) 能登ら：各種橋脚断面形状の耐荷力の検討（その2），宮地技報No.12, 1996
- 3) 建設省土木研究所，日本橋梁建設協会：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書（VII），1997.4

1997.10.31 受付

## グラビア写真説明

### 正沢橋梁

正沢橋梁は、長野県の農道整備事業の一環として架けられた橋で、将来は地元名川村の管理ということで、架設当初より村民の関心も高く見学者が途絶えることはありませんでした。

現場は、林道の上50mに架ける為、ケーブルクレーン斜吊工法となりました。まず、アーチ部材を林道の地組ヤードで面組後、ケーブルで運搬し斜吊索で保持します。面組をすることにより足場を地上で組むことができ、安全面ではとても有利に作業を進める事ができました。

アーチ架設後は、P2側より支柱、補剛桁をそれぞれアーチ頂部よりキャンバーの具合を調べながら架設を行いました。橋体の架設終了後ケーブルクレーンを撤去し、床版工事及び橋面工事に移りました。特に親柱、高欄は地元民の意見を多く取り入れ、村のシンボルといえるようなものであります。

開通により学校への近道ができるということで、開通を待つ声も多く、村民との交流もできた思いで深い橋の一つであります。

(海沼)